第 61 卷 第 1 期 天 文 学 报 Vol.61 No.1
2020 年 1 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Jan., 2020

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2020.1.00x

内日冕的绿线强度分布研究 *

李子涵 [1,3] 刘 煜 [1,2,3†] 张雪飞 [3‡] 梁红飞 [1] 沙飞扬 [3] 于 晋 [4] 敦金平 [5]

(1 云南师范大学物理与电子信息学院 昆明 650011)
(2 西南交通大学物理科学与技术学院 成都 611756)
(3 中国科学院云南天文台 昆明 650011)
(4 中国华云气象科技集团有限公司 北京 100081)
(5 中国气象局空间天气重点开放实验室/国家卫星气象中心（国家空间天气监测预警中心）；许健民气象卫星创新中心 北京 100081)

摘要 日冕是太阳大气活动的关键区域, 是日地空间天气的源头. 受观测限制, 人们对日冕低层大气等离子体结构和磁场状态的研究非常欠缺, 国际上对于可见光波段日冕低层大气的亮度分层研究很少. 本文利用丽江日冕仪 YOGIS(Yunnan Green-line Imaging System) 的日冕绿线（Fe_{XIV}5303 Å）观测资料, 对内日冕区域（1.03$R_{\odot}$-1.25$R_{\odot}$）亮结构及其中冕环进行了有效的强度衰减分析. 本文通过对亮结构的强度在太阳径向高度上进行了指数衰减拟合, 比较这些拟合结果发现所得到的静态内冕环的衰减指数在一固定值附近. 然后将比较明显的冕环提取出来, 通过对不同高度的强度进行相同的指数拟合, 得出的衰减指数与亮结构中也比较相近, 这对进一步研究日冕中的各项物理参数演化提供了参考.

关键词 太阳: 日冕, 太阳: 日冕绿线, 太阳: 日冕仪, 太阳: 衰减指数

中图分类号: P160; **文献标识码**: A

1 引言

日冕是太阳大气的最外层，由高度电离低密度的热等离子体构成，温度能够达到百万度，是大规模太阳活动和灾难性的空间天气的起源，它包含了极其丰富的信息和各种物理过程. 早在 2000 多年前，中国古代已经有了日食的观测记录，1851 年首次在日食时成功进行了日冕照相[1].

法国科学家里奥（Bernard.Lyot）于 1931 年发明了日冕仪, 并首次成功地在无日食条件下观测到了日冕[2]. 日冕仪能够直接探测到日冕信号的一个前提是, 观测地点的天

2022-09-20 收到原稿, 2022-12-26 收到修改稿

* 联合基金项目（U1931116）、云南省高校高能天体物理重点实验室、国家自然科学基金项目（11873090、12173086、11533009）资助

†lyu@ynao.ac.cn

‡zhangxuefei@ynao.ac.cn

空背景亮度必须尽可能低. 为了最大限度的消除散射光, 一般在海拔 3000 m 左右的高山上进行日冕仪的观测, 当天气晴朗时, 太阳附近的天空亮度可低达日面亮度的 10^{-5} 量级, 从而通过日冕仪可观测到内冕[1].

日冕绿线（5303Å）最早是在日食期间观测中发现的[3], 里奥发明日冕仪之后该线被广泛用于日冕的常规观测.5303Å 属于 Fe_{XIV} 基态的磁偶极子跃迁, 由光谱项 $^2P_{3/2}$ 到 $^2P_{1/2}$ 的跃迁产生[4], 它的形成温度约为 $1.8{\times}10^6K$, 是日冕中最强的可见光波段发射线, 也是日全食期间被人们广泛使用的一条谱线. 正是通过长期积累的地面 5303Å 观测资料, 国际上为研究日冕长周期活动专门定义了日冕指数这一重要指标 (Coronal Index; 即 CI)[5–6].

磁场是控制太阳活动的重要物理量, 太阳耀斑、日冕波等日冕活动都与磁场有关[7–9]. 太阳大气中的等离子体主要被控制分布于磁结构中, 在极紫外 (EUV) 波段或 X 射线波段观察到了太阳大气中充满了明亮的环状结构[10–11]. 由于这些环比周围的等离子体要亮得多, 这意味着其内部压力和密度的相对增强. 日冕中的环状结构也被称为冕环, 广泛分布在太阳宁静区和活动区中[12], 形态上类似磁结构[13–15], 是一种很好的磁结构反映, 它也是光球与日冕之间的能量通道. 不同的日冕发射线, 比如日冕红线和绿线, 可以显示不同的日冕磁场的局部结构[16]. 对于日冕绿线 Fe_{XIV},1997 年 Wang 等人利用 SOHO（Solar and Heliospheric Observatory）飞船上搭载的 LASCO（Large-Angle Spectroscopic Coronagraph）-C1 日冕仪观测资料研究发现大尺度日冕温度、强度分布与底层光球 (冕环足点处) 磁场结构和强度密切相关[17], 表明日冕绿线和日冕磁场具有一定程度的相关性, 并且相关系数随着日冕高度递减（从 $1.5R_{\odot}$ 到 $1.15R_{\odot}$）而又明显增强变大趋势, 但受 C1 观测视场影响, 最小高度限制在 $1.1R_{\odot}$. 借助丽江地面日冕仪观测的优势（其日冕观测的最低高度可达 $1.03R_{\odot}$）,Zhang 等人在最近的统计研究中也发现在不同纬度冕环强度与磁场均在 $1.1R_{\odot}$ 以上范围内相关系数较高[18], 首次明确指出相关系数最大值应该发生在 $1.1R_{\odot}$ 高度处附近.Zhang 等人同时也指出在冕环顶部具有更高的相关系数, 磁场对高温日冕辐射的主导作用在闭合冕环中占比更大, 暗示了基于日冕绿线数据对未来定量研究磁场和日冕强度更具有参考. 重要的是该研究表明冕环足点弱的相关性反应了足点附近的日冕加热机制与环顶部不同, 这一发现意味着 DC（dissipation of currents, 电流耗散）和 AC（dissipation of Alfven and magnetosonic waves, 阿尔文波和磁声波耗散）加热机制或许同时存在整个冕环系统中, 但 DC 加热机制在冕环顶部附近占比更大, 其研究结果有望进一步估算与日冕加热相关的定标定律和验证日冕磁场的理论模型提供观测证据. 利用日冕绿线观测和其他波长数据, 可以推导出等离子体密度、温度、速度、磁场等参数, 并将其用于日冕物理研究[19–21]. 近年来, 通过 Fe_{XII}1075nm 等一些近红外日冕禁发射线直接进行日冕磁场测量也已经成为可能[22–23]. 此外在长周期研究中日冕绿线强度随时间和纬度分布存在一些周期性变化[24], 日冕绿线亮度与磁场强度的相关系数随纬度的变化也呈现出明显的周期性[25–26]. 对于日冕绿线, 它除了能揭示长期日冕周期及其与其他太阳现象的关系外, 利用其对太阳活动的高分辨率观测也有助于理解日冕加热和太阳风加速等问题[27], 包括探测太阳边缘日冕波动和日冕物质抛射[28].

日冕辐射强度相对于光球辐射非常弱, 并随高度急剧下降. 在日面边缘相同高度处,

局部日冕绿线的亮度在太阳活动区域周围会显著增强, 并在黑子附近达到最大值[29]. 我们在一些活动区附近通常可以看到形态复杂的日冕亮结构, 这也反映了活动区上方的日冕磁场结构的复杂性.

日冕绿线的数据主要来自地面日冕仪, 自 LASCO-C1 仪器因低温失效后, 不再开展空间日冕绿线观测[30]. 张雪飞等人基于丽江日冕绿线和 SDO（Solar Dynamics Observatory）/AIA（Atmospheric Imaging Assembly）多波段的日冕数据进行分析, 研究结果首次发现 5303 Å 和 211 Å 相比 SDO/AIA 的其它波段具有更高的相关性[31]. 这对于精确跟踪 5303 Å 观测到的发生在日面边缘上方的明亮的日冕环或者其它日冕结构, 结合 211 Å 的观测可能将日冕中不同高度的物理过程联系起来开展分析研究. 同时, 地面日冕仪观测因受到昼夜交替、局地天气条件等因素的影响, 容易造成观测数据的不连续性和结果分析上的误差, 而 AIA 211 Å 的观测以及其它 EUV 波段的空间连续资料, 或许助于填补地基日冕绿线数据“缺失”的观测空白.

因此, 保持长期的绿线观测是非常重要的. 通过国际上多个地面日冕观测站的长期通力合作, 目前已获得连续数个太阳活动周期的标准日冕绿线资料. 这些宝贵资料被用来分析研究日冕的长周期活动规律[32–34], 弥补了后期空间日冕仪资料经常间断的不足. 当前, 日冕绿线的地面观测站点主要有: 斯洛伐克的卢穆尼克峰[35]、俄罗斯的基斯洛沃茨克[36] 和中国丽江[28]. 中国丽江日冕仪观测站是于 2013 年与日本国立天文台乘鞍站合作建成运行至今[18]. 虽然绿线 Fe_{XIV}5303Å 已经被长期用来作为日冕监测的工具, 但对绿线观测的信息还远未被完全挖掘. 本文我们通过丽江 10 cm 日冕仪的绿线观测资料, 筛选出了一些 2020 年以来的观测资料, 对日冕绿线强度的衰减进行拟合分析. 在第 1 节中, 我们介绍了绿线观测和数据处理方法. 在第 2 节中, 我们对处理后的日冕亮结构及冕环进行拟合. 在第 3 节中, 给出了结果和讨论. 最后, 第 4 节是结论部分.

2 日冕绿线观测和数据处理

2013 年, 中国科学院国家天文台、云南天文台与日本国立天文台合作, 将乘鞍（Norikura）站 10 cm 口径 Lyot 日冕仪进行升级改造后运送安装在丽江高美古观测站. 丽江高美古为低纬度高海拔地区, 天空散射光低, 大气观测条件良好[37–38]. 统计结果显示, 当天空晴朗时, 丽江站整层大气光学波段的平均天空背景亮度低于 20 个百万分之一, 适合于日冕仪观测条件.

目前,10 cm 日冕仪在丽江已经良好运行观测近 10 yr, 丽江站这架日冕仪重 100 kg, 总长度近 3 m, 在 5303Å 的主镜焦距为 1490 mm, 其配备赤道跟踪装置和高精度窄带里奥滤光器（以 5303Å 为中心的 1Å FWHM 带宽）和 CCD 相机（1024×1204 像素）, 其突出优点是能够观测日冕的低层结构至 $0.03R_\odot$ 处[39]. 终端成像系统 YOGIS（Yunnan Observatories Green-line Imaging System）为日冕数据提供了 64´×64´ 视场 (x 和 y 方向约 $2R_\odot$）, 适用于按时间序列观测日冕内部结构, 通过 CCD 相机来记录日冕图像, 该系统可以获得单峰、双峰、±0.45Å 模式的图像, 然后重复 8 次, 以提高信噪比[40]. 丽江日冕仪 YOGIS 系统工作在日冕绿线观测低层日冕大气的形态和多普勒速度场, 时间分辨率能够达到 1 s 量级. 丽江日冕仪不仅是目前国内唯一能够高精度对低层日冕绿线成像和采集多普勒速度场的日冕仪, 并且它迄今保持着世界上最长的日冕绿线观测记

录[41].

首先我们对原始数据进行预处理, 去除了天空背景连续谱散射光, 并用相应的暗场和平场进行了校正. 图 1 我们使用了 2021 年 10 月 30 日拍摄的日冕绿线完整图像, 日冕距太阳边缘最小高度 $0.03R_{\odot}$, 图像分辨率为 2.67”$\cdot$px^{-1}, 在 x 轴方向为 $1.5R_{\odot}$, 在 y 轴方向为 $1.3R_{\odot}$. 在图 1 左图中我们可以比较明显的看出图中白色方框中圈出的区域存在结构复杂的亮结构, 结合 SDO 观测其对应的太阳活动区为 AR12886, 磁场位形为 α/α. 因为我们的目的是对日冕绿线强度衰减进行分析, 所以我们主要选取了日冕中比较明显的部分, 也就是图像中白色方框圈出绿线强度较强位置处的亮结构部分. 我们截取了白色方框中的部分如右图所示, 其中可以看出存在冕环结构.

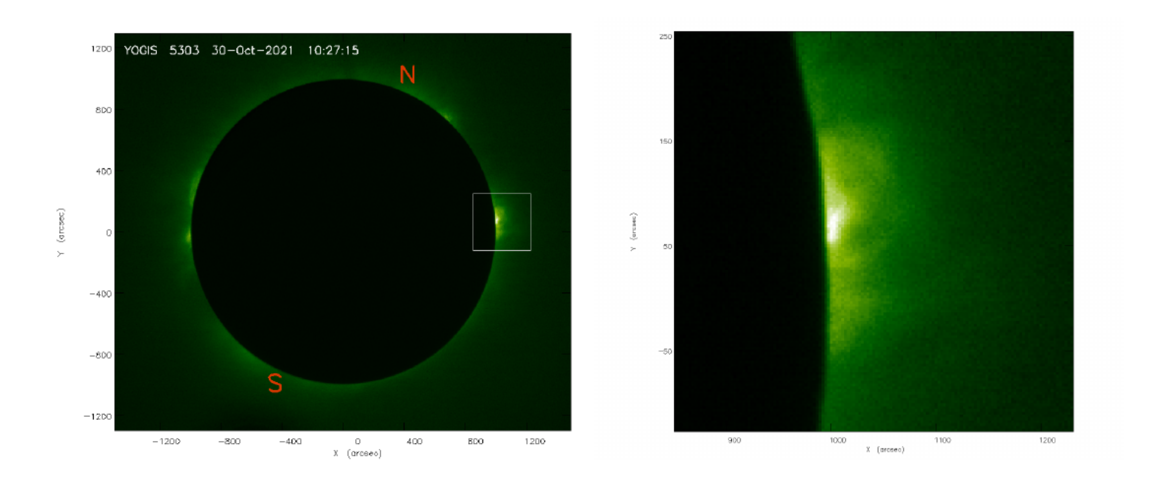


图 1 左图为丽江日冕仪 2021 年 10 月 30 日 10：27：15 拍摄的太阳日冕绿线完整图像, 在 x 轴方向为 $1.5R_{\odot}$, 在 y 轴方向为 $1.3R_{\odot}$, 白色方框是我们所感兴趣的日冕亮结构, 右图为左图方框内的亮结构放大图.

Fig. 1 The left picture shows the complete image of the green line of the solar corona taken by the Lijiang coronagraph at 10:27:15 on October 30, 2021, which is $1.5R_{\odot}$ in the X-axis direction and $1.3R_{\odot}$ in the Y-axis direction. The white box is the coronal bright structure we are interested in, and the right picture is the enlarged image of the bright structure in the left picture.

随后我们对图 1 中完整日冕图像采用圆霍夫变换确定了其掩体的中心坐标和半径, 采用确定的掩体中心坐标来对图像沿掩体边缘左侧按逆时针方向 360° 进行极坐标展开, 展开的径向高度为 $1.25R_{\odot}$, 如图 2 所示, x 轴为位置角（0°——360°）, y 轴为距掩体的像素高度. 我们在图 2 中对每个位置角的径向强度进行了提取, 按照其强度确定了对应亮结构的范围, 在图中为两条白线中间的范围 177°——188°. 我们筛选了一些 2020 年以来其他日期的观测质量较好、亮结构较清晰的观测资料, 用上述同样的方法对原始数据进行处理, 得到了全部日期的日冕绿线亮结构范围内的强度值.

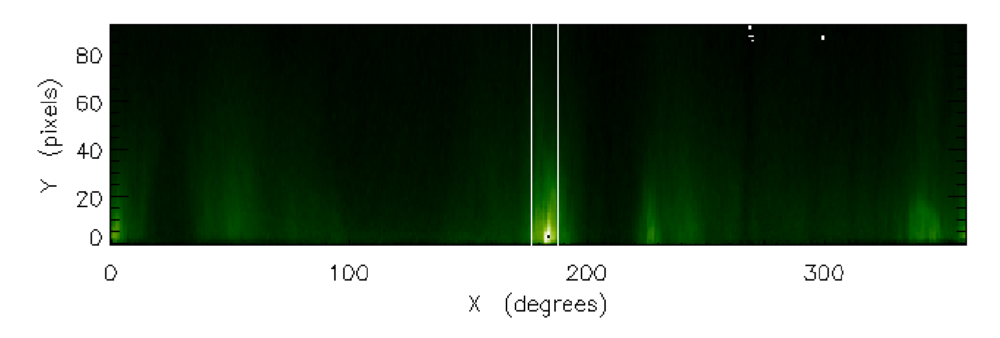


图 2 图 1 左图完整日冕绿线图像沿掩体边缘左侧在 $1.25R_\odot$ 范围内极坐标展开, 两条白线之间是我们所确定的亮结构范围 177°—188°.

Fig. 2 The left image of the coronal green line of Figure 1 is expanded in polar coordinates in the range of $1.25R_\odot$ along the left side of the cover edge. Between the two white lines is the range of the bright structure we determined from 177° to 188°

如图 3 所示, 我们还在 2021 年 11 月 3 日和 2021 年 10 月 30 日的日冕绿线观测资料中找到了比较清晰的冕环. 我们手动将冕环轮廓圈定出来, 通过区域生长法确定出冕环结构, 并将确定的冕环全部位置坐标信息提取出来, 我们用红色虚线在图中标出了了冕环的结构. 然后与之前一样, 按照圆霍夫变换对全日面图像识别出掩体中心坐标和掩体半径, 在掩体半径 1.01 倍处, 步长为掩体半径的 0.005 倍向外取掩体半径的同心圆, 每个同心圆的宽度我们设置为 2 px（每个半径 ±1 px）, 在图中我们用黄色实线标记了不同高度同心圆的部分圆弧, 蓝色实线标定了环顶附近的位置. 通过取不同高度的同心圆与冕环相交部分, 我们就可以得到每个高度上的冕环强度值.

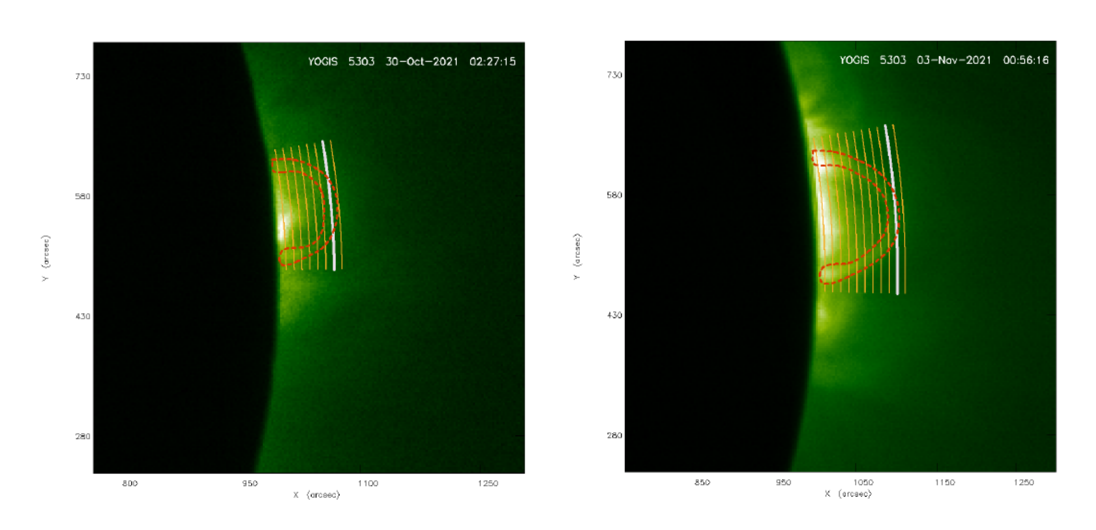


图 3 2021 年 11 月 3 日和 2021 年 10 月 30 日日冕绿线局部观测资料, 红色虚线圈定了冕环的范围, 黄色实线为不同高度的圆弧, 白色实线标定了环顶附近的位置.

Fig. 3 Local observation data of the coronal green line on November 3, 2021 and October 30, 2021. The red dashed line delineates the scope of the coronal loop, the yellow solid line is the arc of different heights, and the white solid line demarcates the position of the top of the loop.

3 日冕亮结构及冕环的强度拟合

首先我们对图 2 中在亮结构范围内（位置角 177°——188°）的每个 y 轴像素点高度的强度取平均值, 将它作为亮结构在特定高度上的强度值, 这样我们得到了每个像素点高度上的日冕绿线亮结构强度值. 然后我们选出了 2020 年以来质量较好的部分绿线资料如表 1 所示, 使用与上述同样方法对这些资料进行处理, 得到了每个日期的亮结构的强度. 对于图 3 中的冕环, 我们得到的不同高度的同心圆与冕环相交部分的强度值, 对每个高度上的强度值取了平均作为冕环在特定高度上的强度.

表 1 选择日冕绿线资料的观测日期、时间、位置角范围、活动区及磁场位形
Table 1 The observation date, time, range of position Angle, active area and magnetic field configuration of the selected coronal green line data

Number	Data	Time/UT	Position Angle	Active Region	Hale Class
01	2020.11.16	04:05:14	2°—5°	AR12781	α /α
02	2020.11.30	02:15:29	217°—229°	AR12790	β/β
03	2020.12.07	02:58:42	345°—359°	AR12785	α/α
04	2021.10.23	02:02:29	224°—232°	AR12888	α/-
05	2021.10.24	01:08:43	219°—232°	AR12888	α/α
06	2021.10.30	02:27:15	177°—188°	AR12886	α/α
07	2021.11.01	01:48:28	1°—9°	AR12890	/
08	2021.11.03	00:56:16	176°—190°	AR12887	$\beta\gamma/\beta$
09	2021.12.26	06:12:10	189°—207°	AR12907	$\beta\gamma/\beta\gamma$
10	2022.01.01	05:07:13	122°—167°	AR12920	β/β
11	2022.01.09	02:49:54	331°—348°	AR12927	α/-
12	2022.01.26	09:04:48	26°—60°	AR12938	β/β

我们通过掩体边缘 $1.03R_\odot$ 到 $1.25R_\odot$ 范围内的日冕绿线强度值发现, 强度有时会呈现先增强, 后下降的趋势. 这是因为掩体边缘衍射造成临近日面边缘处的杂散光强度显著增加, 因此我们均从强度最大值高度开始取值. 我们通过上述得到不同结构的强度分布, 将使用指数函数形式 $F(x) = a \times e^{b \times x} + c$, 来对日冕绿线亮结构和冕环强度在太阳径向高度上进行拟合, 式中 x 为距太阳边缘高度（单位：角秒）, a 、b 、c 为我们的待定参数, 这里我们重点关注指数 b 的值. 为了确定衰减指数我们这里采用指数函数形式拟合, 其形式也借鉴于日冕指数的形式[6], 日冕指数（CI）是对日冕绿线的地面观测得出的, 用于标定太阳在日冕绿线 5303Å 波段的辐照度. 日冕指数兼顾了内日冕（小于 1.25 $R_\odot$）的高指数衰减和较高日冕的低指数衰减的不同分布特征. 本文中, 我们仅对丽江数据的内日冕构建衰减指数模型, 期待由单一衰减指数值就能够较明显确定强度的衰减规律, 所以我们针对丽江地面日冕仪对内日冕的观测资料采用单指数函数形式进行拟合.

4　拟合结果与讨论

通过指数函数形式 $F(x) = a \times e^{b\times x} + c$, 对日冕绿线亮结构和冕环强度在太阳径向高度上的拟合, 我们得到的结果如图 4、图 5 所示. 图 4 为图 3 中日冕绿线图像冕环强度沿掩体边缘径向方向的拟合结果, 图 5 为通过极坐标展开方法对亮结构强度进行指数拟合的结果. 我们对每个高度上的强度取标准差作为误差, 在拟合过程图 4、图 5 中以误差棒的形式标注出. 根据卡方检验（Chi-square test）, 确定自由度和显著性水平 $\alpha = 0.05$, 来对我们的拟合结果进行拟合优度的检验.

在图 4 中绿色的曲线为上述图 3 中两冕环强度通过指数函数的拟合曲线, 用 loop fit 表示, 这两天比较清晰的冕环, 其环顶高度位置分别为 $1.11R_\odot$ 和 $1.13R_\odot$, 我们得到了拟合指数 index(即 b), 结果分别为: -0.0153、-0.0156, 得到的两个指数值差别很小. χ^2 值分别为 0.59、0.65, 相应在卡方检验中 P 值均在 0.995 以上. 我们取标准差作为误差, 拟合的指数 b 误差分别为 23%、9%.

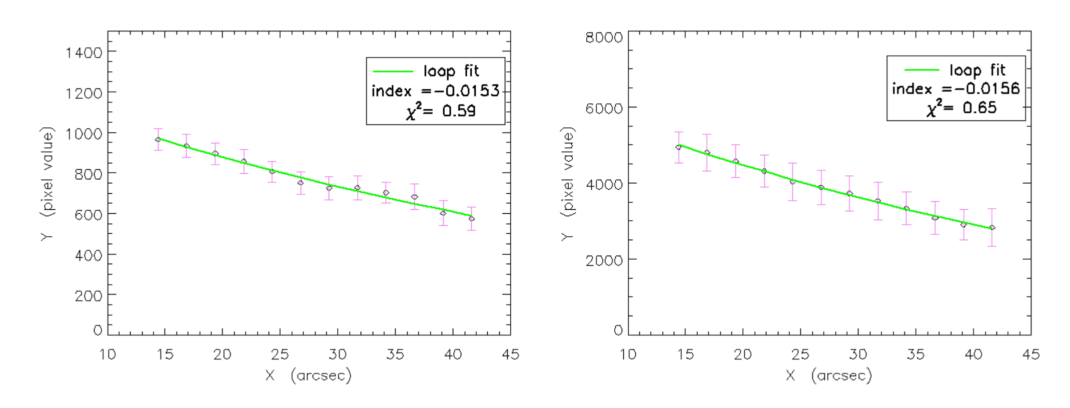


图 4　图 3 中两个日冕绿线图像冕环强度沿掩体边缘径向方向的拟合结果, 绿色的曲线为指数函数的拟合, 用 loop fit 表示, 拟合指数 b 和 χ^2 在图例中标出.

Fig. 4　The fitting results of the coronal ring intensity along the radial direction of the cover edge of the two coronal green line images in Figure 3. The green curve is the fitting of the exponential function, represented by loop fit, and the fitting index b and χ^2 are marked in the legend

在图 5 中对表 1 内所有日期的资料拟合情况, 用 fit 表示, 由误差棒的分布可以看出, 在取亮结构较低高度处的误差较大, 随高度上升误差逐渐减小, 而图 4 中提取冕环强度的误差值较为均匀. 我们得到的 index 值 (即 b) 分别为：-0.0153、-0.0148、-0.0154、-0.0149、-0.0148、-0.0145、-0.0282、-0.0154、-0.0146、-0.0153、-0.015、-0.015. 拟合得到的指数 b 的值均在-0.015 附近（图中蓝色曲线所示）, 除去-0.0282 的值（图（7）中用红色曲线标出）, 其他值偏差均在-0.001 以内, 最大偏差在 6.7%. 我们对拟合的日冕资料进行分析发现, 日冕亮结构能够比较均匀的分布, 有些能够看出亮结构整体呈被环状包围的轮廓. 而拟合结果为-0.0282 的资料中整体亮结构范围较小, 距离太阳边缘较近, 且类似于小的冕环结构位于亮结构整体的边缘, 并未能与底部发亮部分构成亮结构整体, 较于掩体边缘较亮的部分衰减明显更慢. 另一方面, 我们对这一时刻前后连续时间的观测资料对比发现亮结构整体形态变化较大, 其实际并非处于静态, 而是处于亮结构的动态

消散过程中. 所以对其整体积分来拟合的结果与其他值偏差较大, 本文亦就不考虑它为典型的静态稳定的绿线冕环样本. 对排除后的拟合结果进行卡方检验 χ^2 值分别为 0.78、2.64、0.38、0.12、0.79、0.09、0.59、0.37、1.21、1.30、2.87. 相应在卡方检验中 P 值均在 0.995 以上. 取标准差作为误差, 拟合的指数 b 误差范围在 1%——6.4%, 相比于图 4 中拟合指数误差较小, 考虑到由于冕环较低, 对冕环强度的选取数据点较少, 可能会导致拟合产生的误差较大.

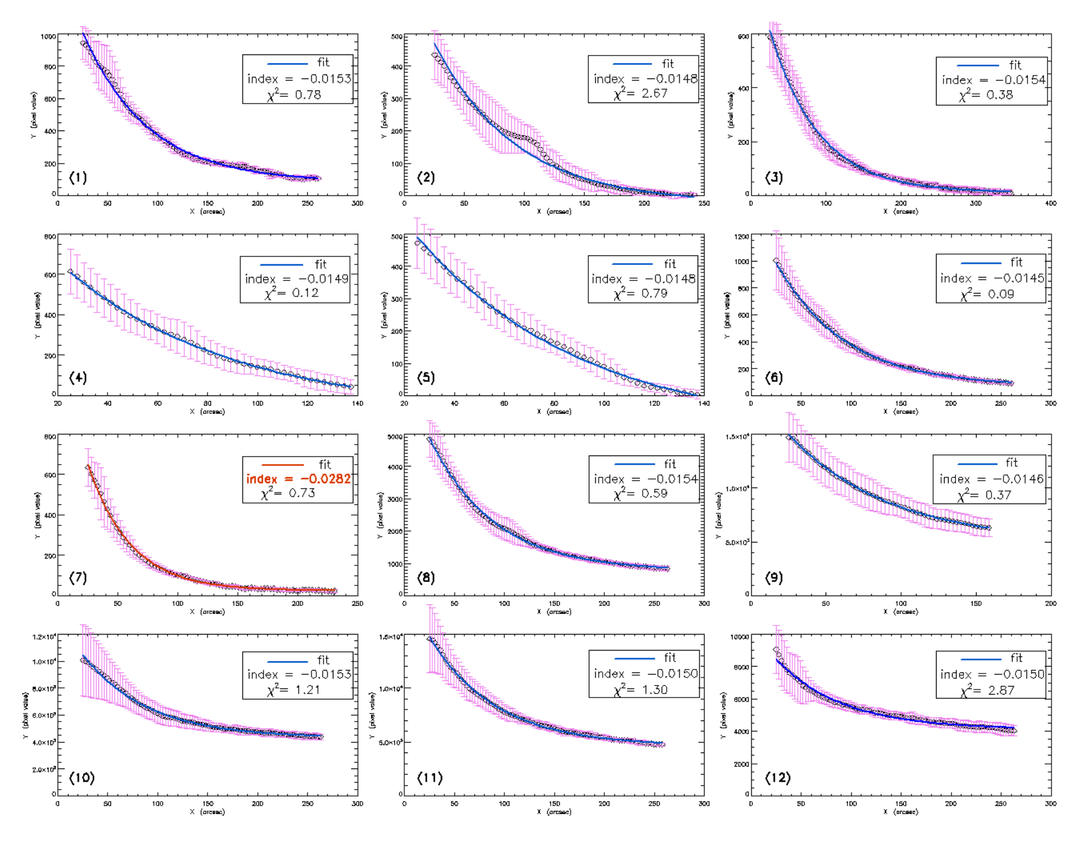


图 5 对选出的资料通过极坐标展开方法对亮结构强度进行指数拟合的结果, 指数拟合为蓝色的曲线用 fit 表示, 拟合指数 index 和 χ^2 在图例中标出. 图中红色曲线为拟合指数偏离大部分值的曲线.

Fig. 5 Results of exponential fitting of the intensity of bright structure by means of polar coordinate expansion for selected data. The blue curve of exponential fitting is represented by fit, and the fitting index and χ^2 are marked in the legend. The red curve in the figure is the curve where the fitting index deviates from most values

为了对比冕环与亮结构这两种拟合结果的区别, 我们将上述两个冕环及其所对应亮结构的拟合放在了一起, 如图 6 所示. 在图 6 中, 绿色曲线为对冕环的拟合, 蓝色曲线为对冕环所对应亮结构部分的拟合. 由于对亮结构的拟合在靠近太阳边缘距离较近处, 掩体边缘杂散光的影响较大, 使强度存在增强的趋势. 我们根据图像考虑到是由于冕环两足点处的中间位置强度过大导致, 所以亮结构会存在这种现象, 但对冕环结构并不存在明显的影响. 所以我们去除了亮结构强度上升的点, 亮结构比冕环的初始位置更高一些.

在同一太阳高度上, 我们发现亮结构的数值强度均比冕环的强度更大, 我们分析也是由于大部分亮结构冕环两足点的中间位置强度对亮结构贡献较大, 所以在同一高度积

分后的亮结构强度明显更大于所对应的冕环结构强度. 我们的拟合结果分别为：-0.0153 和-0.0145、-0.0156 和-0.0154, 冕环的衰减指数 b 的值均小于所以对应的亮结构的指数 b 值. 同理也是我们提到的冕环在亮结构的边缘位置, 亮结构的主要强度来自冕环包围的底部, 所以冕环相比于整个亮结构来说, 其衰减的更快, 自然得到的指数 b 的值更小. 虽然我们对两个日冕绿线冕环拟合得到的指数值差别不大, 但由于考虑到两个日冕资料日期较为相近, 所以可能并不能代表冕环的具体衰减情况. 但通过确定出冕环结构来拟合出衰减指数与通过图像极坐标展开纵向切片做的拟合得出的指数结果整体偏差不大, 均在-0.015 左右. 对于亮结构中其他不清晰的冕环我们试着去识别并圈定冕环或是太阳边缘发散的环状结构, 但是拟合出的指数结果较小, 与文中拟合出-0.015 的值相差近一个数量级. 我们考虑是由于本不清晰的冕环强度自身较低, 距离太阳表面距离较近, 与很多其他的亮结构混在一起, 加上背景场的影响, 由于积分效应, 可能会对其强度影响较大.

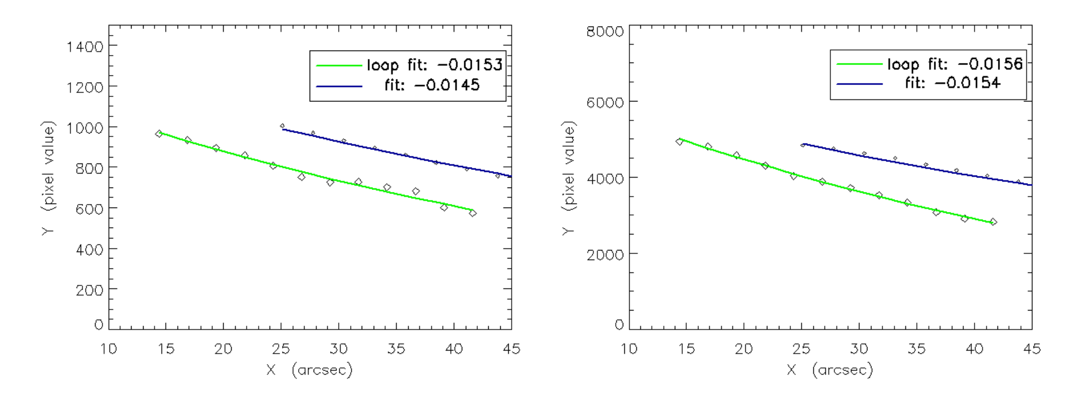


图 6 对两个日冕绿线冕环资料拟合及其对应的亮结构拟合, 绿色曲线为对冕环的拟合, 蓝色曲线为对冕环所对应亮结构部分的拟合.

Fig. 6 The fitting of coronal rings with two coronal green lines and their corresponding bright structures. The green curve is the fitting of coronal rings, and the blue curve is the fitting of the corresponding bright structures of coronal loop

在本文中, 我们利用丽江 10 cm 日冕仪观测资料, 分析了日冕绿线 Fe_{XIV}（5303 Å）强度的衰减, 通过图像极坐标展开及选取冕环来对不同的日冕结构强度进行指数衰减拟合, 比较了两种不同方法提取的强度分布. 结果表明, 不同日冕结构随高度衰减拟合所得到的指数结果均在一固定值附近, 且通过卡方检验证明我们的拟合优度在较高水平. 我们将本文得到的结果与 1973 年 Rušin 的拟合 [42] 比较分析, 文中说明日冕亮度按高度衰减可以用 n 个衰减指数形式之和来表达, 而用 n=2 就可以针对不同时间段、不同方位角的日冕结构反映其衰减情况. 而针对不同情况都有不同的系数和衰减指数. 我们结果也符合 Rušin 的指数函数表示, 转换单位后的指数值在 -0.9 附近, 符合 Rušin 文中拟合指数值的范围, 并且针对丽江日冕仪绿线数据观测情况我们可以仅用一个衰减函数来表示.

此外, 我们选取的冕环环顶位置在 $1.1R_{\odot}$ 附近, 拟合结果对于亮结构整体强度在相同范围内随高度的变化呈现相同的趋势. 在更高的范围, 亮结构的强度衰减更偏向线性

衰减情况, 低日冕以闭合磁场为主导, 高日冕以开放磁场为主导, 可见活动区与宁静区日冕加热机制不同, 在冕环中闭环加热时, 直流（电流耗散）和交流（阿尔芬和电磁波耗散）机制同时作用于整个闭环系统 [18].1997 年 Wang 等人利用空间太阳望远镜 SOHO LASCO/C1 日冕仪绿线资料发现 [17], 冕环足点（$1.15R_{\odot}$）附近等离子体密度与磁场强度密切相关, 所计算出的日冕形态结构与观测非常相似, 但他们资料缺少更低层日冕结构的分布信息. 我们利用丽江绿线数据发现在 $1.1R_{\odot}$ 附近处, 低冕环环顶处的亮度与日冕外推磁场强度统计相关性最好, 并且发现在这一高度范围不同日冕结构均能够较好吻合, 用丽江地面日冕仪观测的优势可以将更靠近太阳边缘的日冕结构进行深入研究. 综上所述, 我们认为在上述通过指数函数所有拟合结果指数 b 在-0.015±0.001 范围内是比较符合我们大部分的日冕绿线强度资料的. 最后, 日冕绿线的地面观测通常受到昼夜交替、当地天气条件等复杂因素的限制, 容易导致观测的不连续和数据分析的不精确的误差, 以及丽江日冕仪的孔径小, 可能本文中得出的一些结论并不完备, 需要未来高分辨率的日冕观测进一步证实和改进.

5 结论

日冕作为太阳大气的最外层, 是太阳大气活动的关键区域, 也是地球物理和空间现象的重要辐射源. 日冕研究在科学应用领域具有特殊的重要性以及诸多尚未解决的问题, 特别是由于观测限制, 人们对日冕低层大气等离子体结构和磁场状态的研究非常欠缺, 国际上对于可见光波段日冕低层大气的亮度研究很少. 在本文中, 我们利用丽江日冕仪 YOGIS 的日冕绿线（Fe_{XIV}5303 Å）观测资料, 对内日冕区域（$1.03R_{\odot}$-$1.25R_{\odot}$）亮结构及其中静态内冕环首次专门进行了有效的强度衰减分析, 我们通过对太阳盘极坐标展开确定亮结构范围和圈定冕环的方式来提取出不同高度日冕绿线强度. 对亮结构及其冕环的强度在太阳径向高度上进行了指数衰减拟合, 通过比较这些拟合结果发现所得到的衰减指数均在一固定值（-0.015）附近, 与历史上 Rušin 基于光谱扫描测光的标准统计拟合结果吻合 [42]. 我们拟合冕环高度在 $1.1R_{\odot}$ 与其对应亮结构拟合结果相近, 最近的冕绿线研究中, 借助日冕绿线的强亮度和对光球层磁场的高灵敏度,Zhang 等人 [18] 通过日冕绿线研究发现冕环顶部的高度 $1.1R_{\odot}$ 处亮度与磁场强度相关性最高, 证实了日冕绿线亮度与磁场强度之间的密切关系. 日冕磁场在太阳活动中起着重要作用, 基于日冕绿线的测量, 进一步深入探讨日冕绿线与磁场强度的相关性, 能为日冕磁场测量寻找观测证据. 日冕绿线 5303 Å 与 EUV 波段中 211 Å 强度相关性最高 [18], 且日冕形态相似, 未来也可以利用不同波段对日冕深入研究, 有望精确跟踪 5303 Å 观测到发生在日面边缘的日冕结构, 为研究日冕在不同高度上发生的物理过程联合起来分析. 接下来我们还将要开展针对不同太阳活动周观测时期以及日冕纬度分布来继续深入开展本项研究.

参 考 文 献

[1] 章振大. 日冕物理. 北京: 科学出版社, 2000

[2] Lyot, B. MNRAS, 1939, 99:580

[3] Young C A. Nature, 1870, 532:533

[4] Mogilevsky E,Ioshpa B, Obridko V. On the polarization of the solar coronal emission lines. SoPh, 1973, 33:169

[5] Rybanský M,Rušin V,Minarovjech M. Coronal index of solar activity-Solar-terrestrial research. Space Science Reviews, 2001, 95:227

[6] Rybanský M,Rušin V,Minarovjech M,et al. Reexamination of the coronal index of solar activity. Journal of Geophysical Research, 2005, 110:A08106

[7] Sakurai T,Ichimoto K,Raju K P,et al. Spectroscopic Observation of Coronal Waves. SoPh, 2002, 209:265

[8] Shen Y D,Liu Y. Evidence for the Wave Nature of an Extreme Ultraviolet Wave Observed by the Atmospheric Imaging Assembly Onboard the Solar Dynamics Observatory. ApJ, 2012, 754:7

[9] Tian H,Mcintosh S W,Wang T,et al. Persistent Doppler shift oscillations observed with HINODE/EIS in the solar corona: spectroscopic signatures of Alfvenic waves and recurring upflows. ApJ, 2012, 759:144

[10] Peres G,Serio S,Vaiana G S,et al. Coronal closed structures.IV-Hydrodynamical stability and response to heating perturbations. ApJ, 1982, 252:791

[11] Vaiana G S,Krieger A S,Timothy A F. Identification and analysis of structures in the corona from X-ray photography. SoPh, 1973, 32:81

[12] Reale F. coronal loops: observations and modeling of confined plasma. LRCA, 2014, 11:4

[13] Aschwanden M J. Physics of the Solar Corona: An Introduction With Problems and Solutions. Pour La Science, 2005, 35:55

[14] Aschwanden M J,Poland A I,Rabin D M. The New Solar Corona. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2001, 39:175

[15] Poletto G,Vaiana G S,Zombeck M V,et al. A comparison of coronal X-ray structures of active regions with magnetic fields computed from photospheric observations. SoPh, 1975, 44:83

[16] Habbal S R,Druckmuller M,Morgan H,et al. Mapping the Distribution of Electron Temperature and Fe Charge States in the Corona with Total Solar Eclipse Observations. ApJ, 2010, 708:1650

[17] Wang Y M,Sheeley N R,Hawley S H. The Green Line Corona and Its Relation to the Photospheric Magnetic Field. ApJ, 1997, 485:419

[18] Zhang X F,Liu Y,Zhao M Y,et al. On the Relation Between Coronal Green Line Brightness and Magnetic Fields Intensity. Research in Astronomy and Astrophysics, 2022, 22:11

[19] Makarov V I, Tlatov A G, Callebaut D K. Temperature of polar corona of the Sun during the last 50 years (1952-2001). Solar Variability as an Input to the Earth's Environment,Tatranská, 2003, 535:217

[20] Sakurai T,Ichimoto K,Raju K P,et al. Spectroscopic Observation of Coronal Waves. SoPh, 2002, 209:265

[21] Shen Y D,Liu Y. Evidence for the Wave Nature of an Extreme Ultraviolet Wave Observed by the Atmospheric Imaging Assembly Onboard the Solar Dynamics Observatory. ApJ, 2012, 754:96

[22] Liu Y,Shen Y D. The coronal magnetic field reversal observed by the SOLARC instrument. Science in China(Series G:Physics,Mechanics and Astronomy), 2009, 52:1696

[23] Liu Y,Lin H. Observational Test of Coronal Magnetic Field Models.I.Comparison with Potential Field Model. ApJ, 2007, 680:1496

[24] Mancuso S,Lee T S,Taricco C,et al. Multivariate analysis of intermediate periodicities of the green corona. Proceedings of the International Astronomical Union, 2018, 13:57

[25] Guhathakurta M,Fisher R R,Altrock R C. Large-Scale Coronal Temperature and Density Distributions,1984–1992. ApJ, 1993, 414:145

[26] Guhathakurta M,Rottman G J,Fisher R R,et al. Coronal density and temperature structure from coordinated observations associated with the total solar eclipse of 1988 March 18. ApJ, 1992, 388:633

[27] Smartt R N,Zhang Z,Smutko M F. Post-flare coronal loop interaction. SoPh, 1993, 148:139

[28] Liu Y,Zhang X F. The coronal green line monitoring: a traditional but powerful tool for coronal physics. Proceedings of the International Astronomical Union, 2018, 13:169

[29] Badalyan O G,Obridko V N. Two Regularities in the Coronal Green-Line Brightness-Magnetic Field Coupling and the Heating of the Corona. SoPh, 2006, 238:271

[30] Koutchmy S,Contesse L,Viladrich C,et al. About the Fe XIV 530.3 NM Line Emissions of the Middle Corona. The Dynamic Sun: Challenges for Theory and Observations, 2005, 11:26

[31] Zhang X F,Liu Y,Zhao M Y,et al. Comparison of the Coronal Green-line Intensities with the EUV Measurements from SDO/AIA. Research in Astronomy and Astrophysics, 2022, 22:15

[32] Badalyan O G,Obridko V N,et al. Brightness of the Coronal Green Line and Prediction for Activity Cycles 23 and 24. SoPh, 2001, 199:421

[33] Sykora J. The large-scale behaviour of the green emission corona FeXIV 530.3 NM over the last 4.5 solar activity cycles. Advances in Space Research, 1994, 14:73

[34] Sakurai T,Suematsu Y. Observational studies of the solar cycle at the National Astronomical Observatory of Japan. Advances in Space Research, 2002, 29:1565

[35] Sakurai T,Rušin V,Minarovjech M. Solar-cycle variation of near-sun sky brightness observed with coronagraphs. Advances in Space Research, 2002, 34:297

[36] Gnevyshev M N,Nikolsky G M,Sazanov A A. The Lyot-coronagraph with 53 cm objective.SoPh, 1967, 2:223

[37] Zhao M Y,Liu Y,Elmhamdi A,et al. Automatic data analysis for the Sky Brightness Monitor. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014 ,443:1955

[38] Zhao M Y,Liu Y,Elmhamdi A,et al. Conditions for Coronal Observation at the Lijiang Observatory in 2011. SoPh, 2017, 293:13

[39] 刘煜. 国内首架日冕仪落户云南丽江. 天文爱好者, 2014, 1:4

[40] Kiyoshi I,Motokazu N,Nobuyuki T,et al. A New Imaging System of the Corona at Norikura. Publications-Astronomical Society of Japan, 1999, 51:383

[41] Sakurai T. Sixty Years of Norikura Solar Observatory. Hinode-3:the 3rd Hinode Science Meeting,Tokyo, 2012, 454:439

[42] Rušin V. The Height Gradient of the Coronal Emission Line 5303 Å. Bulletin of the Astronomical Institute of Czechoslovakia, 1973, 24:121

Study of the Intensity Distribution of the Green Line in the Inner Coron

LI Zi-han[1,3] LIU Yu [1,2,3] ZHANG Xue-fei [3] LIANG Hong-fei[1] SHA Fei-yang[3] YU Jin[4] DUN Jin-ping[5]

(1 School of Physics and Electronic Information Technology,Yunnan Normal University, Kunming 650500)
(2 Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, South West Jiao Tong University, Chengdu 611756)
(3 Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)
(4 China Huayun Meteorological Technology Group Corporation, Beijing 100081)
(5 Key Laboratory of Space Weather, National Satellite Meteorological Center （National Center for Space Weather）,China Meteorological Administration; Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081)

Abstract The corona is a key region of solar atmospheric activity,and the source of solar-terrestrial space weather.Limited by observation,research on the plasma structure and magnetic field state of the lower coronal atmosphere is still very lacking, and there are few international studies on the brightness stratification of the lower coronal atmosphere in the visible light band.In this paper,the coronal green line (Fe_{XIV}5303 Å) observation data of Lijiang coronagraph YOGIS is used to analyze the bright structure and mid-coronal loops in the inner coronal region ($1.03R_{\odot}$-$1.25R_{\odot}$) effectively.By fitting the exponential decay of the intensity of the bright structures at the radial height of the sun,comparing these fitting results,it is found that the decay index of the static inner coronal loops obtained is around a fixed value.Then,the more obvious coronal loops are extracted,and by performing the same exponential fitting on the intensities

of different heights,the obtained decay index is also relatively similar to that of the bright structure,which provides a reference for further study of the evolution of physical parameters in the corona.

Key words Sun: solar corona, Sun: coronal green line, Sun: coronagraph, Sun: decay index